УДК 551.521.8

Е. Е. Ковалев, В. Н. Брыксин, Ю. А. Виноградов, В. Е. Дудкин, С. Б. Козлова, А. М. Маренный, В. В. Маркелов, Н. А. Нефедов, Ю. В. Потапов, В. И. Редько, А. И. Хованская

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИСЗ «КОСМОС-782»

1. Спектрометр заряженных частиц. В эксперименте на ИСЗ «Космос-782» проводились измерения линейных потерь энергии (ЛПЭ) с помощью двух спектрометров, один из которых был установлен внутри, а другой – на наружной поверхности спутника. В качестве датчика в спектрометрах использовался телескоп, состоящий из кремниевого полупроводникового детектора с толщиной чувствительной области 500 *мкм*±3% и площадью 1 *см*^{2} и сцинтилляционного счетчика с кристаллом CsI(Tl) толщиной 10 *мм* и диаметром 10 *мм*. Применение охранного детектора, схем совпадений и антисовпадений исключало регистрацию частиц, прошедших под большим углом к оси телескопа. Электронная схема спектрометра производила амплитудный анализ импульсов, поступающих с полупроводникового детектора, регистрацию импульсов в соответствующих каналах и передачу информации в бортовое запоминающее устройство спутника и на Землю по телеметрической системе. При этом логическое устройство анализатора обеспечивало регистрацию только тех частиц, направления движения которых были близки к нормальному падению на поверхность детектора, длина пробега превышала толщину чувствительной области полупроводникового детектора и энерговыделение в сцинтилляторе было больше выбранного уровня дискриминации.

Измеряемая амплитуда импульса в кремниевом детекторе пропорциональна ЛПЭ заряженной частицы, прошедшей через телескоп. Коэффициент пропорциональности определялся при градуировке спектрометра на альфа-частицах (Pu^{239}) и на ускорителе протонов.

При обработке телеметрической информации для каждой зарегистрированной заряженной частицы была определена величина энерговыделения в кремниевом детекторе и рассчитано значение линейных потерь энергии в биологической ткани. По полученным данным построены дифференциальные $\left(\frac{dN}{dL}(L)\right)$ и интегральные ($N(>L)$) спектры ЛПЭ заряженных частиц. С учетом геометрического фактора телескопа определен дозовый спектр излучения $D(L)$, рассчитано значение эквивалентной дозы и затем получена средняя величина коэффициента качества излучения.

2. Ядерные эмульсии. При измерении спектров ЛПЭ с помощью ядерных эмульсий использовалось два метода. В первом случае измерялся интегральный спектр ЛПЭ по методу, описанному в [1]. Проявление мелкозернистых эмульсий типа ПР-2 проводилось по двухстадийному методу (метод двухпотенциального проявления).

Известно, что для проявления микрокристаллов экспонированного слоя необходимо, чтобы окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) проявителя был электроотрицательнее некоторой величины, называемой пороговым потенциалом проявления. Поэтому для того чтобы избежать неравномерности проявления слоя по глубине в начале проводится пропитка эмульсий проявителем при величине ОВП более электроположительной, чем пороговый потенциал проявления (первая стадия), а затем при более электроотрицательном значении ОВП (вторая стадия). При этом в зависимости от установленной величины ОВП на этой стадии в эмульсии будут проявляться следы заряженных частиц с ЛПЭ выше некоторой определенной величины. Для установления связи между величиной ОВП и пороговым значением ЛПЭ проводилась калибровка ядерных эмульсий. С этой целью контрольные слои эмульсии облучались протонами различных энергий (до 660 *Мэв*), нейтронами (в эмульсии регистрировался спектр протонов отдачи), альфа-частицами от источника Pu^{239}, многозарядными ионами P^{31} с энергией 200 *Мэв*. Эта давало возможность получить широкий набор частиц с различными ЛПЭ.

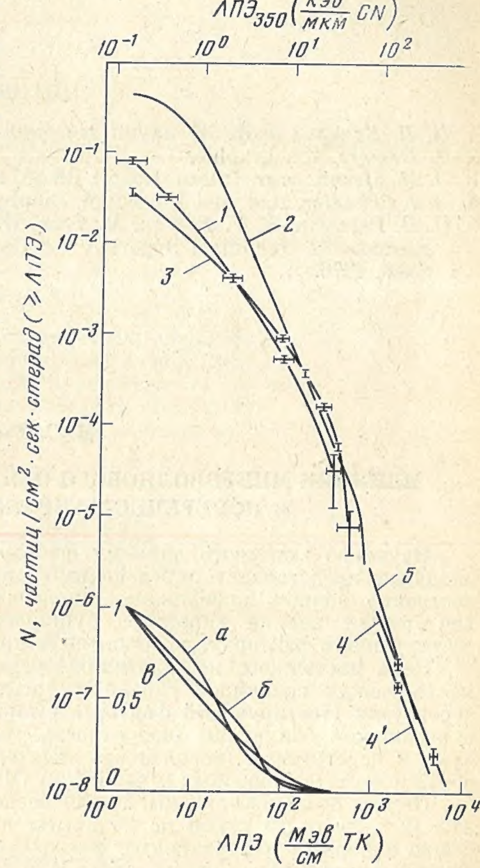
Во втором случае для получения спектров ЛПЭ использовались «традиционные» методы измерений потоков и спектров частиц в ядерных фотоэмульсиях. Использовались слои ядерной эмульсии типа БР-2 с толщиной каждого слоя 600 *мкм*.

Отбор следов частиц в эмульсии производится визуально, причем отбирались треки с углом погружения менее 10°. Степень ионизации среды частицей принято выражать через отношение числа зерен на единице длины следа (g) к числу зерен на единице релятивистского однозарядного трека, имеющего энергию в области минимальных потерь ($g_{\min}$). Такие следы образуют электроны, появляющиеся в результате $\pi-\mu-e$-распада, которые и были отобраны при сканировании этих же фотоэмульсий.

Все однозарядные треки считались протонами. Как показывает анализ литературных данных, примесь других частиц в этой области ионизации незначительна. Треки, образованные многозарядными ионами, исключались визуальным способом.

Для треков с отношением $g/g_{\min}\geqslant 6{,}0$ (черные треки) энергия протонов определялась с помощью соотношения пробег – энергия [2]. В области меньшей относительной ионизации (серые треки, энергия протонов 50 *Мэв*$\leqslant E_p \leqslant$400 *Мэв*) использовалась зависимость $g^* = g/g_{\min} = f(T/M)$ [3], где T и M – кинетическая энергия и масса протона.

3. Диэлектрические трековые детекторы. Экспериментальные точки на спектре ЛПЭ в диапазоне от $\sim 10^2$ до $\sim 10^3$ *кэв/мкм* получены с помощью диэлектрических трековых детекторов. С этой целью в измерительные блоки были помещены «сэндвичи», состоящие из следующих друг за другом детекторов с различными порогами регистрации. Знание пороговых значений позволяет получить интегральный ЛПЭ-спектр путем простого подсчета количества треков на отдельных детекторах. На график зависимости N (ЛПЭ>ЛПЭ$_{\text{порог}}$) от ЛПЭ наносятся скорректированные с учетом угловой эффективности регистрации и эффективности просмотра величины флюенса.



Для измерений ЛПЭ-спектра использовались детекторы двух типов: нитроцеллюлозные и лавсановые, которые находились в двух блоках. Блок № 1 размещался на наружной поверхности спускаемого аппарата спутника. При выводе спутника на орбиту и при спуске контейнер был герметически закрыт крышкой, что предохраняло детекторы от перегрева. Температура поверхности блока не превышала 50° С. Блок был защищен от воздействия УФ-излучения. Блок № 2 находился внутри спутника вблизи оболочки.

Травление нитроцеллюлозных и лавсановых детекторов осуществлялось в течение 10 и 24 *час* в 25%-ном растворе NaOH, насыщенном продуктами травления, при 40 и 50° С. Одновременно с детекторами из экспонированных блоков протравливались образцы тех же материалов, облученные многозарядными ионами на циклотроне Объединенного института ядерных исследований (Дубна). По результатам измерений треков в этих образцах были получены значения порогов регистрации детекторов: ЛПЭ$_{350}$=180 и 450 *кэв/мкм* для нитроцеллюлозных (CN) и лавсановых детекторов соответственно. Угловая эффективность регистрации всех частиц была принята 0,9 и 0,8 для нитроцеллюлозных и лавсановых детекторов, а эффективность просмотра – 0,9 для всех детекторов.

4. Результаты измерений. Результаты проведенных измерений представлены на рисунке. Спектры ЛПЭ по эмульсионным данным получались пересчетом энергетических спектров в спектры ЛПЭ. На этом же рисунке приведены данные измерений на «Скайлэбе» [4]. Анализ приведенных данных показывает, что форма интегрального спектра, полученная с помощью телескопа счетчиков (кривая *1*) внутри спутника, близка к форме спектра, полученного на «Скайлэбе» (кривая *2*), хотя абсолютные значения плотности потока частиц на ИСЗ «Космос-782» ниже. Это можно объяснить более низкой его орбитой. Средняя суточная доза на нем так же ниже, чем на «Скайлэбе» – 22 и 41 *мрад/сутки* соответственно. Формы спектров, полученных с помощью ядерных фотоэмульсий (кривая *3*) и телескопа, несколько отличаются друг от друга. Это можно объяснить различной толщиной защиты, за которой проводились измерения. Следует также иметь в виду, что отличие от телескопа счетчиков для ядерных фотоэмульсий и диэлектрических трековых детекторов приведены данные по числу частиц, пересекающих единицу поверхности со всех направлений. Соответствующая поправка на число частиц, падающих нормально к поверхности, может быть легко сделана, так как угловое распределение излучений близко к изотропному (средний косинус угла падения составляет 0,64±0,08). Данные телескопа по виткам позволили оценить вклад протонов внутреннего радиационного пояса, который при усреднении показаний ряда витков составил 36%.

На этом же рисунке представлен сравнительный ход кривых поглощенной дозы (*а*-телескоп, *б*-эмульсия, *в*-Скайлэб).

Представляет интерес сравнение значений факторов качества *QF*, полученных в этих экспериментах, которые составили: «Скайлэб» – 1,54, телескоп – 1,45 и ядерные фотоэмульсии – 1,47. Следует отметить малое различие в величинах коэффициентов. На рисунке также представлены интегральные спектры тяжелых ионов ($Z \geqslant 5$), полученные с помощью трековых детекторов на ИСЗ «Космос-782» (кривая *4* – снаружи спутника, кривая *4'* – внутри). Здесь же для сравнения представлен спектр тяжелых ионов (кривая *5*), полученный на «Скайлэбе» и приведенный в работе [5]. Следует отметить различия в измеренных потоках, которые также можно объяснить как разной высотой полета, так и различной толщиной защиты.

Дата поступления
13 февраля 1978 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Н. П. Кочеров и др.* Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., *3*, 186, 1969.
2. *P. Demers.* Ionographie. Les Emulsions Nuclears, Princ. et Appl., Montreal, 1958.
3. *R. M. Sternheimer.* Intern. Report RS-38, Brookhaven Lab., 1953.
4. *H. J. Schaefer.* Rad. and Environm. Biophys., *12*, 127, 1975.
5. *D. D. Peterson, E. V. Benton, M. Tran.* HZE-Particle Dosimetry. Experiment K-103 for Kosmos-782, Technical Report № 42. Department of Physics University of San Francisco, 1976.

УДК 539.104

В. С. Тихончук

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРЫС К ПОПЕРЕЧНО-НАПРАВЛЕННЫМ ПЕРЕГРУЗКАМ

Изучение взаимного влияния факторов космического полета с помощью тест-нагрузки представляет определенный интерес [1–3]. Это дает возможность количественно оценить модификацию биологических эффектов. Одновременно такой подход требует знания характера функциональной зависимости между параметрами тестирующего фактора и возникающего при этом эффекта [4].

Цель настоящего исследования – установить характер функциональной зависимости между величиной гибели и временем воздействия поперечно-направленной перегрузки (тестирующий фактор), а также изучить влияние предварительного микроволнового облучения (вероятность смертельного исхода 0,1%) на устойчивость крыс к перегрузкам (вероятность смертельного исхода 50,0%) по критериям смертности и частоте сердечных сокращений (ЧСС).

Опыты были поставлены на 240 беспородных крысах-самках со средней массой 250±19 *г*, всего 10 групп по 24 крысы в каждой. 1–6-я группы подвергались действию поперечно-направленных перегрузок (грудь – спина), 40,0 ед на центрифуге с длиной плеча 4,25 *м* (время подъема и спуска 30 *сек*) в течение 2,52; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 *мин* (площадка) соответственно. 7–10-я группы животных предварительно облучались микроволнами с ПМ 800, 300, 100, 10 *мвт/см²* в течение 0,52; 2,18; 7,77; 240,5 *мин* соответственно. Через 1 *час* 7–10-я группы животных подвергались воздействию перегрузки (грудь – спина) 40 ед в течение 4,25 *мин* (площадка). Изучалась гибель животных в ЧСС.

Результаты и их обсуждение. Величина гибели крыс от времени воздействия перегрузки может быть интерполирована ($2{,}52 \leqslant x \leqslant 5{,}0$) уравнением показательной функции вида: $y = 0{,}278x^{3{,}5923}$, где *y* – гибель, %; *x* – время воздействия, *мин* (рис. 1, кривая *1*). Высокое значение критерия пригодности (F), равное 3,4 [5], не противоречит экстраполяции найденной зависимости до эффекта летальности, равного 0,1% (рис. 1, пунктирная часть кривой *1*). Характер функциональной зависимости предполагает ограниченное число функционально-ответственных систем в формировании конечного эффекта – гибели. В первом приближении таковой может быть сердечно-сосудистая система.

Кривая *2* рис. 1 отражает динамику ЧСС в период воздействия перегрузки. Она включает в себя информацию о ЧСС как выживших, так и погибших животных (срок наблюдения после прекращения перегрузки до суток). Тенденция брадикардии при увеличении времени воздействия перегрузки интерполируется уравнением линейной функции: $y = 524{,}1 - 83{,}03x$, где *y* – ЧСС, *мин*; *x* – время воздействия перегрузки, *мин*.

Сопоставление кривых *1* и *2* рис. 1 свидетельствует о тесной связи между величиной брадикардии и вероятностью гибели. Патогенетическая значимость такой зависимости, очевидно, должна проявляться и при других видах перегрузок в сопоставимых параметрах.

С целью проверки такого предположения были использованы ранее полученные на 142 крысах данные при продольном (голова – таз) ускорении 5,0 ед (подъем и спуск 20 *сек*). Кривая *1* на рис. 2 отражает динамику ЧСС при времени воздействия продольной перегрузки до 4 *мин*. Не имея экспериментальных данных о ЧСС свыше 4 *мин* воздействия, мы допустили три ее развития: *1а*, *1б*, *1в* (рис. 2). Пере-

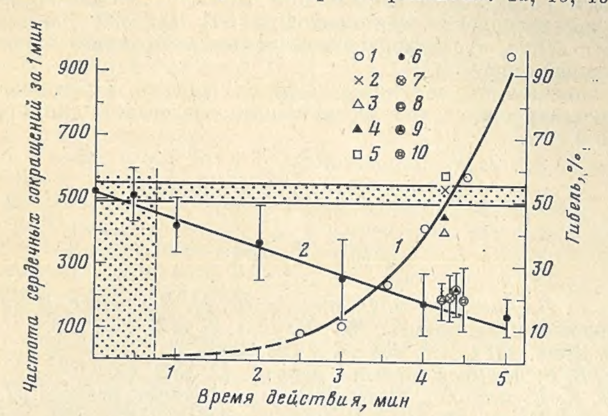


Рис. 1. Гибель (*1–5*) и частота сердечных сокращений (*6–10*) у крыс как функция времени воздействия только поперечно-направленной перегрузки (*1*, *6*) и сочетанного СВЧ и перегрузки действия (*2–5*, *7–10*)
2, *7* — 800; *3*, *8* — 300; *4*, *9* — 100; *5*, *10* — 10 *мвт/см²*



Рис. 2. Частота сердечных сокращений (*1*), гибель крыс ожидаемая (*2*) и «исправленная» (*3*) как функция времени воздействия продольной перегрузки

сечение прямых, опущенных с кривой *1* с заданными уровнями гибели, будет не что иное, как прогнозируемая зависимость между величиной эффекта гибели и степенью брадикардии для продольных (кривая *2*, рис. 2) и поперечных перегрузок (рис. 1). С учетом экспериментальных данных при продольных перегрузках (кружки на кривой *3*, рис. 2) зависимость между величиной брадикардии и гибелью независимо от вида перегрузок, при сравнимых параметрах воздействия может быть выражена следующим уравнением гиперболы:

$$y = 2384{,}6/x - 25{,}78,$$

где *y* – гибель, %, *x* – величина брадикардии, %. Полученная зависимость и являлась функциональным эталоном тестирующего фактора (перегрузки) для изучения влияния предварительного микроволнового облучения на устойчивость крыс к поперечно-направленным перегрузкам.

В 7–9-й группах средняя величина градиента ректальной температуры после микроволнового облучения составила ~2° С, в 10-й группе ректальная температура не увеличивалась. ЧСС для соответствующих групп была равна 540±30; 510±20;